



Investigating matrix cracking and fiber failure in composites using artificial intelligence and multiscale models

Roozbeh Mofidian^{*1} , Ramzan Babaei² , Pouya Pashaie³

1. Ph.D, Department of Chemical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

3. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract

In today's advanced world, especially in the fields of mechanical engineering and aerospace industries, composites have gained a prominent position due to their unique feature of high strength along with low weight. However, the complex behavior of these materials requires accurate analysis and advanced tools for modeling and predicting their structural damage. The present study, by combining meso-macro multiscale models and continuum damage mechanics concepts, presents a new approach for analyzing and evaluating damage in composite structures. This study uses a quasi-simultaneous multiscale modeling framework that enables comprehensive analysis of matrix cracking and fiber failure using advanced finite element simulation methods and image processing tools. In addition, a subroutine based on continuum failure mechanics concepts can be developed in finite element software that is capable of analyzing the damage evolution, including crack progression, fiber failure, and ultimate failure load prediction of composite structures in a progressive manner. On the other hand, the application of artificial intelligence methods, especially in image processing, has reduced computational time and costs and significantly increased the accuracy of mechanical analyses. These intelligent multiscale approaches play a key role in optimizing design and accurately predicting failure mechanisms. These methods are effective tools for improving the performance and reliability of composite structures, especially in complex and sensitive aerospace applications.

Keywords

Composites

Matrix cracking

Fiber failure

Quasi-simultaneous multiscale

Damage mechanics

Artificial intelligence

Received: 12.04.2025

Revised: 02.07.2025

Accepted: 12.07.2025

* Corresponding Author

Roozbeh Mofidian

Email

roozbeh.mofidian@yahoo.com

1- Introduction

A composite is a structural material that consists of a combination of two or more materials. The properties and performance of composites are strongly dependent on their constituent components. In general, a composite contains at least one discontinuous component (phase), called the reinforcement, surrounded by a continuous matrix. Fiberglass, concrete, and wood are

examples of composites [1]. Composites have properties such as high strength, desirable stiffness, lightness, and a suitable strength-to-weight ratio. Composites are composed of two main parts: the matrix and the reinforcing material. The matrix acts as a glue that holds everything together, holds the reinforcing material in place, and transfers loads between them. On the other hand, the reinforcing

How to Cite this Article:

[1] R. Mofidian, R. Babaei, and P. Pashaie, "Investigating matrix cracking and fiber failure in composites using artificial intelligence and multiscale models," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 165–182, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.516396.1120> (in Persian)



material gives the composites high strength and stiffness [2]. Fibers in composites can be used in one-dimensional (unidirectional), two-dimensional (planar), or three-dimensional [3].

Recently, the application of composites has increased dramatically due to their outstanding properties, such as high specific strength and stiffness [4]. However, these materials suffer from complex damage mechanisms, including matrix cracking, interlaminar delamination, fiber breakage, fiber bending, and the interaction of these damage modes under different loading conditions [5].

Matrix cracking and interlayer delamination are the most important types of damage in composite layers under mechanical loading. These damage modes rapidly degrade the mechanical properties of composite layers. Furthermore, they may cause stress redistribution in the layers and ultimately lead to catastrophic failure of the structure, even when the applied load is less than the strength predicted by classical multilayer theory [6].

A review of the literature shows that considerable research has been conducted on intralaminar failures or interlaminar damage modes in composite layers [7]. Among the models developed to analyze the progressive failure of composite layers, models based on continuum failure mechanics have been recognized as the most accurate models for predicting the fracture toughness of composites [8].

Mohammadi et al. [9] studied the gradual damage response of symmetric multilayer composites under uniform in-plane loading using the 3D continuum failure mechanics theory and the layer-wise method. In another study, Chen et al. [10] presented a combined elastoplastic-damage model to estimate the fracture strengths of composite layers.

Accordingly, the aim of this study is to review the previous work of the authors in which the initiation and growth of the background crack is no longer considered with strain energy tools and crack failure parameters, and also to develop a finite element model for the analysis of the gradual failure of composite multilayers that investigates the effects of interlayer damage with artificial intelligence

tools. In this study, different methods of predicting background cracks at the microscopic scale and the challenges associated with each of them are first reviewed. These challenges include the accuracy of the models, the need for experimental data, and the computational complexity, which may lead to limitations in accurate simulations. Then, the use of artificial intelligence-based methods is discussed, which can simulate complex and nonlinear patterns and help improve accuracy and efficiency in complex analyses. In the following, the implementation method of a quasi-simultaneous multi-scale model for simulating the crack mechanism of the substrate is described (Figure 1 and Figure 2). This section thoroughly examines the process of crack initiation and growth and explains how this process can be applied in simulation models to predict the behavior of composites under different loadings and environmental conditions using artificial intelligence tools.

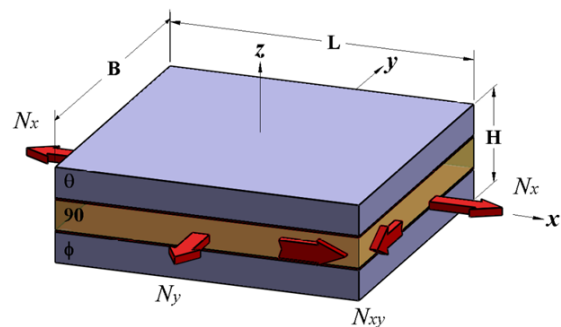


Figure 1: A composite multilayer under general in-plane loading

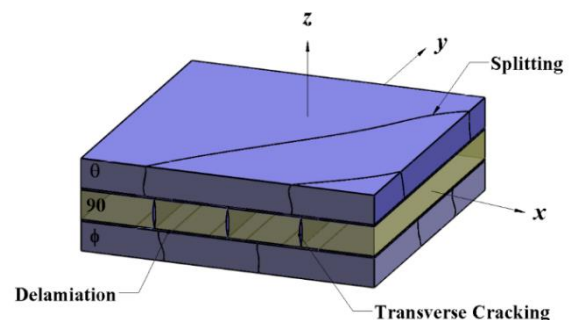


Figure 2: possible damage modes in each individual layer

2- Research methods

As shown in Figure 1, in a unit cell under general in-plane loading conditions, which is extracted in the local coordinate system of the middle layer, each

individual layer may suffer damage related to the loading direction.

Considering these issues, the damaged unit cell (Figure 3) can be replaced by a homogenized, undamaged unit cell (Figure 4) that has equivalent reduced material properties for each individual component. It should be noted that interlayer delamination is not considered in this study.

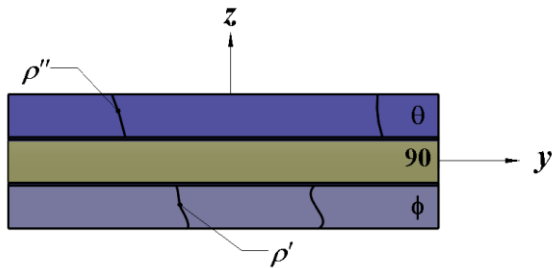


Figure 3: Damaged feature element

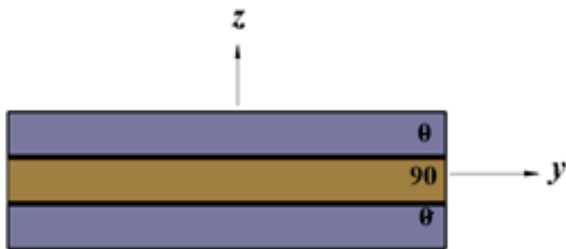


Figure 4: Homogenized feature element

3- Results

In order to investigate the crack growth of the matrix, multilayer or single-layer modeling of composites can be used in Abaqus software. The microstructure of fiber-reinforced composites under mechanical loading is investigated using finite element analysis. The results of this finite element analysis are considered as the true reference solution in this study. A plane strain analysis under displacement boundary conditions is performed in Abaqus software to obtain the stress tensor, i.e., the distributions of σ_{xx} , σ_{yy} and σ_{xy} in the microstructure. In this analysis, viscous element and extended finite element can be used to investigate the crack initiation and growth. The constituent materials in the composites (fibers and matrix) are assumed to be linear or nonlinear and elastic or inelastic. The connection between the fibers and the matrix can be assumed to be completely continuous. The microstructure is subjected to discrete

displacement boundary conditions corresponding to tensile and shear loading, and a set of stress tensor fields is obtained from this simulation in the Abaqus software. Therefore, the finite element analyses provide a set of stress images along with the matrix.

A set of 2D or 3D microstructure images of fiber-reinforced composites is generated by randomly varying the spatial location of the fibers in the matrix. Random algorithms are used to randomly position the fibers. The fibers can be modeled as a circle of constant radius with a constant fiber volume fraction.

The set of random microstructures and stress tensor field maps obtained from the finite element analyses are used as labeled training data for the machine learning model. Data augmentation increases the robustness of the deep learning model, especially in mechanical problems where there is usually limited training data. Common data augmentation techniques in the field of image segmentation include image rotation and inversion. Therefore, a modified data augmentation method that is consistent with the physical laws of the problem is employed.

Finally, a model is trained to map the microstructure to stress tensor field maps, so that after full training, there is no need to use a physics-based problem-solving method. A single model is trained from the beginning to predict the six components of the two-dimensional stress tensor fields from tensile and shear tests with the occurrence (or non-occurrence) of crack growth (or non-growth).

4- Conclusion

This study presents an innovative approach in the field of multiscale mechanical modeling, which can be used to investigate the nonlinear behavior of composite multilayers using an artificial intelligence-based continuum damage mechanics model. In this method, the effects of matrix cracking and fiber failure on the stiffness of each layer are considered independently, using a micromechanical model based on image processing and machine learning.

The new approach based on artificial intelligence technologies is capable of simulating the mechanical behavior of composite multilayers by considering the failure mechanism of matrix cracking and fiber failure. The proposed model is trained using data generated from finite element simulation and is capable of accurately reconstructing stress fields under different loading conditions. In addition to increasing the speed of multiscale analysis of composites with failure mechanisms, the introduced framework has high flexibility to adapt to a variety of materials and failure mechanisms at smaller scales. The model is designed to be integrated with other machine learning models trained to predict the mechanical behavior of materials at different scales.

The salient features of this model include increased efficiency in analyzing failure mechanisms, predicting the growth of fiber separation from the matrix, and providing solutions for homogenizing and localizing material behavior with high accuracy and reducing computational requirements. The method is flexible and can be used under various loading conditions and different structures, especially when limited mechanical data are available. The development perspective of this method includes investigating more complex mechanical behaviors such as the interaction between different failure mechanisms and their more accurate simulation, which will require more advanced computational power. This machine learning-based approach allows for the expansion of multiscale analysis and structural optimization and can be applied in various fields of mechanical science and engineering.

5- References

- [1] R. Mofidian, S. S. Hosseini, M. Miansari, and H. Salmani, *Separation and clarification of Mazandaran Wood and Paper Factory effluent to remove heavy metals using zeolite–agar nanoadsorbent immobilized by Cibacron Blue dye ligand*, *Korean Journal of Chemical Engineering*, pp. 1–12, 2024. (in Persian)
- [2] M. Jahanshahi, R. Mofidian, S. S. Hosseini, and M. Miansari, *Investigation of mechanical properties of granular γ -alumina using experimental nano indentation and nano scratch tests*, *SN Applied Sciences*, vol. 5, p. 164, 2023. doi: [10.1007/s42452-023-05388-7](https://doi.org/10.1007/s42452-023-05388-7) (in Persian)
- [3] B. Abdi, R. Tayebbe, E. Rezaei-Seresht, F. M. Zonoz, and R. Mofidian, *ZnO/AgSbO₃ as an improved nanophotocatalyst in the synthesis of some naphthopyranopyrimidines*, *Inorganic Chemistry Communications*, p. 113212, 2024. doi: [10.1016/j.inoche.2024.113212](https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113212) (in Persian)
- [4] R. Mofidian, I. Hassankhani, M. Jahanshahi, S. S. Hosseini, and M. Miansari, *Cost effective design of a 200 kW on-grid rooftop photovoltaic system using PVsyst software in Shiraz*, *Journal of Engineering and Applied Research*, vol. 1, no. 1, pp. 13–24, 2024. doi: [10.48301/jear.2024.194109](https://doi.org/10.48301/jear.2024.194109) (in Persian)
- [5] R. Mofidian, Q. Xiong, A. M. Ranjbar, M. A. Sabbaghi, A. Farhadi, and S. M. Alizadeh, *Adsorption of lactoferrin and bovine serum albumin nanoparticles on pellicular two-layer agarose-nickel at reactive blue 4 in affinity chromatography*, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, p. 105084, 2021. doi: [10.1016/j.jece.2021.105084](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105084) (in Persian)
- [6] R. Mofidian, A. Barati, M. Jahanshahi, and M. H. Shahavi, *Fabrication of novel agarose–nickel bilayer composite for purification of protein nanoparticles in expanded bed adsorption column*, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 159, pp. 291–299, 2020. doi: [10.1016/j.cherd.2020.03.024](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.03.024) (in Persian)
- [7] R. Mofidian, *CFD modeling of DME synthesis based on methanol dehydration process by an adiabatic reactor: Characterization*, *Latin American Applied Research*, vol. 54, pp. 595–600, 2024. doi: [10.52292/j.laar.2024.1115](https://doi.org/10.52292/j.laar.2024.1115) (in Persian)
- [8] R. Mofidian, M. Jahanshahi, S. S. Hosseini, and M. Miansari, *CFD simulation of methanol dehydration step through an adiabatic fixed-bed reactor of DME synthesis*, *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 24, pp. 31–37, 2023. doi: [10.31699/IJCPE.2023.4.3](https://doi.org/10.31699/IJCPE.2023.4.3) (in Persian)

[9] F. Mohammad, I. B. Bwatanglang, H. A. Al-Lohedan, J. P. Shaik, H. H. Al-Tilasi, and A. A. Soleiman, *Influence of surface coating towards the controlled toxicity of ZnO nanoparticles in vitro*, *Coatings*, vol. 13, p. 172, 2023. doi: [10.3390/coatings13010172](https://doi.org/10.3390/coatings13010172)

[10] L. Zuo, C. Xiao, Z. Yan, L. Huang, Z. Guo, and Y. Ge, *Characterization and prediction modeling of membrane distillation enhanced disc solar still*, *Journal of Cleaner Production*, vol. 449, p. 141742, 2024. doi: [10.1016/j.jclepro.2023.141742](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.141742)



بررسی ترک زمینه و شکست الیاف در کامپوزیت‌ها با استفاده از هوش مصنوعی و مدل‌های

چندمقیاسی

روزبه مفیدیان^{۱*}، رمضان بابایی^۲، پویا پاشایی^۳

۱- دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

در دنیای پیشرفته امروز، به‌ویژه در حوزه‌های مهندسی مکانیک و صنایع هوافضا، کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی منحصربه‌فرد استحکام بالا در کنار وزن کم، جایگاه برجسته‌ای یافته‌اند. با این حال، رفتار پیچیده این مواد، تحلیل دقیق و ابزارهای پیشرفته‌ای را برای مدل‌سازی و پیش‌بینی آسیب‌های ساختاری آن‌ها می‌طلبد. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ترکیب مدل‌های چندمقیاسی مزو-ماکرو و مفاهیم مکانیک آسیب پیوسته، رویکردی نوین برای تحلیل و ارزیابی خرابی در ساختارهای کامپوزیتی ارائه می‌کند. این مطالعه از چارچوب مدل‌های چندمقیاسی شبه‌هم‌زمان بهره می‌گیرد که با استفاده از روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی المان محدود و ابزارهای پردازش تصویر، امکان تحلیل جامع ترک‌خوردگی زمینه و شکست الیاف را فراهم می‌سازد. افزون بر این، زبرنامه‌ای مبتنی بر مفاهیم مکانیک خرابی پیوسته در نرم‌افزار المان محدود می‌توان توسعه داد که قادر باشد تکامل آسیب‌ها، از جمله پیشرفت ترک‌ها، شکست الیاف و پیش‌بینی بار نهایی شکست سازه‌های کامپوزیت را به‌صورت پیش‌رونده تحلیل کند. از سوی دیگر، به‌کارگیری روش‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه در پردازش تصویر، سبب کاهش زمان و هزینه‌های محاسباتی شده و دقت تحلیل‌های مکانیکی را به طرز چشمگیری افزایش داده است. این رویکردهای چندمقیاسی هوشمند نقشی کلیدی در بهینه‌سازی طراحی و پیش‌بینی دقیق مکانیزم‌های خرابی ایفا می‌کنند. این روش‌ها، به‌ویژه در کاربردهای پیچیده و حساس هوافضایی، ابزارهای مؤثری برای ارتقای عملکرد و قابلیت اطمینان ساختارهای کامپوزیت‌ها به شمار می‌روند.

کلمات کلیدی

کامپوزیت‌ها
ترک زمینه
شکست الیاف
چندمقیاسی شبه‌هم‌زمان
مکانیک آسیب
هوش مصنوعی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵

*نویسنده مسئول

روزبه مفیدیان

ایمیل

roozbeh.mofidian@yahoo.com

۱- مقدمه

کننده. ماتریس مانند چسبی که همه چیز را در کنار هم نگه می‌دارد، مواد تقویت کننده را در جای خود نگه می‌دارد و بارها را بین آنها منتقل می‌کند. از سوی دیگر، مواد تقویت کننده، استحکام و سفتی پرقدرتی را به کامپوزیت‌ها می‌دهند [۲]. الیاف در کامپوزیت‌ها می‌توانند بصورت یک بعدی (یک جهته) یا دوبعدی (صفحه ای) و یا سه بعدی بکار گرفته شود [۳].

اخیراً کاربرد کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های برجسته آن‌ها از جمله مقاومت ویژه و سختی ویژه بالا به طور چشمگیری افزایش یافته

کامپوزیت یک ماده سازه ای است که شامل ترکیبی از دو یا چند ماده است. خواص و عملکرد کامپوزیت‌ها قویا به اجزای سازنده آنها وابسته است. به طور کلی در کامپوزیت حداقل یک جزء (فاز) غیرپیوسته، که به تقویت کننده موسوم است، وجود دارد، که توسط یک زمینه پیوسته احاطه شده است. فایبرگلاس، بتن و چوب نمونه هایی از کامپوزیت‌ها هستند [۱]. کامپوزیت‌ها دارای خواصی چون استحکام بالا، سختی مطلوب، سبک بودن، و نسبت استحکام به وزن مناسب، می باشند. کامپوزیت‌ها از دو بخش اصلی تشکیل شده اند: ماتریس و مواد تقویت

How to Cite this Article:

[1] R. Mofidian, R. Babaei, and P. Pashaie, "Investigating matrix cracking and fiber failure in composites using artificial intelligence and multiscale models," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 165–182, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.516396.1120>(in Persian)



مدلی مبتنی بر انرژی در چارچوب مکانیک خرابی پیوسته ارائه کردند تا خواص شکست تدریجی لایه‌های کامپوزیتی استوانه‌ای را پیش‌بینی کنند.

محمدی و همکاران [۱۴] واکنش آسیب تدریجی چندلایه کامپوزیت متقارن تحت بارگذاری درون‌صفحه‌ای یکنواخت را با استفاده از نظریه مکانیک خرابی پیوسته سه‌بعدی و روش لایر-وایز مطالعه کردند. در مطالعه دیگری، چن و همکاران [۱۵] مدلی ترکیبی الاستوپلاستیک-آسیب برای تخمین مقاومت‌های شکست لایه‌های کامپوزیت‌ها ارائه دادند.

بررسی مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های کلاسیک مکانیک خراب پیوسته عمدتاً در چارچوب ترمودینامیک محیط‌های پیوسته با متغیرهای داخلی ساخته شده‌اند. در این مدل‌ها، وضعیت آسیب به طور کامل توسط پتانسیل ترمودینامیکی و پتانسیل اتلاف تعیین می‌شود. با این حال، لادوز و همکاران [۱۶] رویکرد جدیدی با استفاده از مکانیک خرابی پیوسته در مقیاس میانی ارائه دادند. مفهوم اصلی این مدل‌سازی، تعریف عامل‌های آسیب اسکالر خاص برای هر حالت آسیب بود که در کامپوزیت‌ها با لایه‌چینی مختلف رخ می‌دهد. مزیت اصلی این روش آن بود که سازوکارهای آسیب که در مقیاس سازه بسیار پیچیده هستند، در مقیاس اجزای پایه قابل تمایز و توصیف بودند. دوویل و همکاران [۱۷] از یک مدل مبتنی بر مکانیک خرابی پیوسته برای چندلایه کامپوزیت و یک مدل ناحیه چسبنده برای لایه واسط استفاده کردند تا شکست تدریجی یک لایه T300/914 شبه‌ایزوتروپیک با سوراخ باز را بررسی کنند. روش مشابهی توسط جانسون و همکاران [۱۸] برای مطالعه شکست‌های درون‌لایه‌ای و لایه‌لایه شدن در چندلایه کامپوزیت تحت بارگذاری ضربه‌ای به کار گرفته شد. فنگ و همکاران [۱۹] از مدل آسیب تدریجی درونی نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی حالت‌های شکست درون‌صفحه‌ای در چندلایه کامپوزیت و همچنین از یک مدل آسیب پیاده‌سازی شده با المان چسبنده تعریف‌شده توسط کاربر برای مدل‌سازی جدایش بین لایه‌ای و ترک‌های زمینه عرضی در لایه‌های واسط استفاده کردند. با این حال، این مدل تغییرشکل‌های غیرقابل بازگشت مواد کامپوزیتی را در نظر نگرفت.

شایان‌ذکر است که در میان روش‌های ذکر شده برای مدل‌سازی لایه‌لایه شدن، مدل آسیب پیوسته لادوز [۲۰] توانایی پیش‌بینی شروع و گسترش جدایش بین لایه‌ای با کمترین هزینه محاسباتی را دارد.

است [۴]. با این حال، این مواد دچار مکانیسم‌های پیچیده آسیب می‌شوند، از جمله ترک‌خوردگی زمینه، جدایش بین لایه‌ای، شکست الیاف، خمیدگی الیاف و تعامل این حالت‌های آسیب تحت شرایط بارگذاری مختلف [۵].

ترک‌خوردگی زمینه و جدایش بین لایه‌ای از مهم‌ترین انواع آسیب‌ها در لایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری مکانیکی هستند. این حالت‌های آسیب به سرعت خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، ممکن است باعث باز توزیع تنش‌ها در لایه‌ها شده و در نهایت منجر به شکست فاجعه‌بار سازه شود، حتی زمانی که بار اعمالی کمتر از مقاومت پیش‌بینی شده توسط نظریه چندلایه‌های کلاسیک باشد [۶].

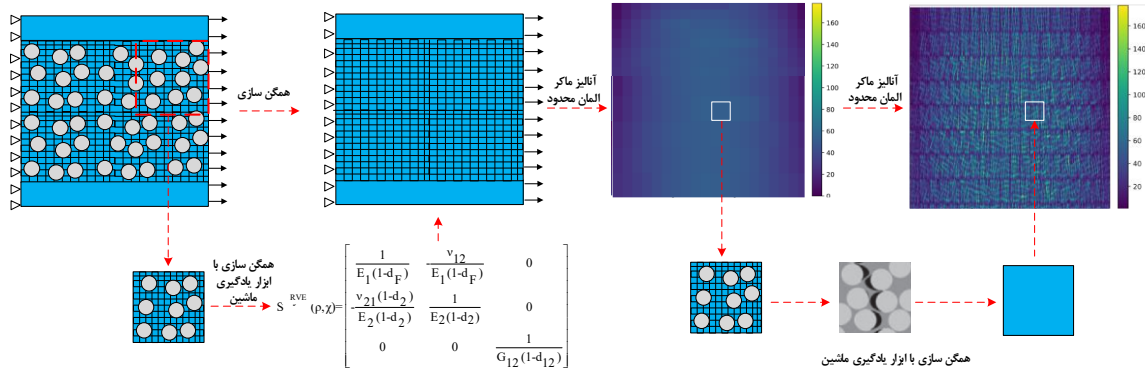
بررسی ادبیات نشان می‌دهد که تحقیقات قابل‌توجهی در مورد شکست‌های درون‌لایه‌ای یا حالت‌های آسیب بین‌لایه‌ای در لایه‌های کامپوزیت‌ها انجام شده است. در میان مدل‌های توسعه‌یافته برای تحلیل شکست تدریجی لایه‌های کامپوزیت، مدل‌های مبتنی بر مکانیک خرابی پیوسته به‌عنوان دقیق‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی مقاومت شکست کامپوزیت‌ها شناخته شده‌اند [۷].

در مطالعات انجام شده با استفاده از مکانیک خرابی پیوسته، پارامترهای آسیب به صورت یک عامل اسکالر (ایزوتروپیک) یا تانسورهای مرتبه اول، دوم و حتی چهارم و هشتم (نا ایزوتروپیک) در نظر گرفته شده‌اند [۸]. آلن و همکاران [۹] مدلی برای تحلیل آسیب تدریجی در لایه‌های کامپوزیت‌ها در چارچوب مکانیک آسیب پیشنهاد کردند. باربرو و دوویو [۱۰] یک تانسور آسیب متقارن مرتبه دوم را در چارچوب مکانیک خرابی پیوسته برای مدل‌سازی تحلیل آسیب تدریجی لایه‌های کامپوزیت‌ها به کار گرفتند. آن‌ها یک مدل تنش صفحه‌ای دوبعدی توسعه دادند که در آن تکامل آسیب و کاهش سختی برای کامپوزیت از پیش همگن‌سازی شده محاسبه شد و فرمول‌بندی ساده‌سازی شد.

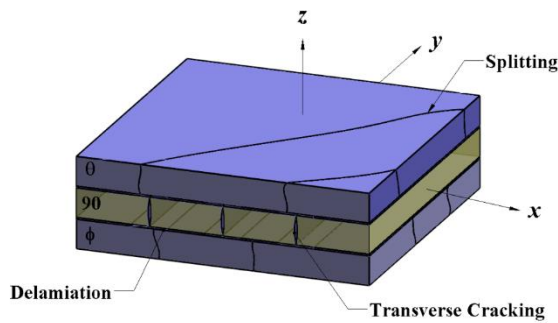
لونتی و همکاران [۱۱] رویکرد باربرو را توسعه داده و رفتار آسیب ارتوتروپیک را از منظر سه مقدار ویژه آسیب بررسی کردند. آن‌ها از یک مدل آسیب سه‌محوره در روش اجزای محدود جامد سه‌بعدی استفاده کردند. کامانیو و همکاران [۱۲] مدلی ترمودینامیکی دوبعدی برای شبیه‌سازی تکامل آسیب در لایه‌های کامپوزیت‌ها با استفاده از نظریه مکانیک خرابی پیوسته و روش المان محدود ارائه دادند و از مدل الاستیک-آسیب خود برای پیش‌بینی مقاومت شکست و اثرات اندازه در کامپوزیت‌ها کربن/اپوکسی با شکاف استفاده کردند. لیو و ژنگ [۱۳]

محدودیت‌هایی در شبیه‌سازی‌های دقیق منجر شوند. سپس به استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی پرداخته می‌شود که می‌توانند الگوهای پیچیده و غیرخطی را شبیه‌سازی کرده و در تحلیل‌های پیچیده به بهبود دقت و کارایی کمک کنند. در ادامه، روش اجرای مدل چندمقیاس شبه‌همزمان برای شبیه‌سازی مکانیزم ترک زمینه شرح داده می‌شود (شکل ۱). این بخش به طور کامل فرآیند پیدایش و رشد ترک زمینه را بررسی کرده و چگونگی اعمال این فرآیند در مدل‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف و شرایط محیطی با استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی توضیح می‌دهد.

علاوه بر این، برخلاف روش‌های مدل ناحیه چسبناک یا فن بسته‌شدن مجازی ترک، در این مدل نیازی به فن المان‌بندی مجدد نیست. بر این اساس، هدف این مطالعه، بررسی تحقیق قبلی نویسندگان [۲۱] است که در آن پیدایش و رشد ترک زمینه دیگر با ابزارهای انرژی کرنشی و پارامترهای شکست ترک در نظر گرفته نشود و همچنین گسترش یک مدل اجزای محدود برای تحلیل شکست تدریجی چندلایه کامپوزیت که اثرات آسیب درون‌لایه‌ای با ابزار هوش مصنوعی بررسی کند. در این مطالعه ابتدا روش‌های مختلف پیش‌بینی ترک زمینه در مقیاس میکروسکوپی و چالش‌های مرتبط با هر یک از آن‌ها بررسی می‌شود. این چالش‌ها شامل دقت مدل‌ها، نیاز به داده‌های تجربی و پیچیدگی محاسباتی هستند که ممکن است به



شکل ۱: مدل‌سازی چند مقیاسی ماکرو-میکرو موادی کامپوزیتی با ابزار هوش مصنوعی (بادگیری ماشین)



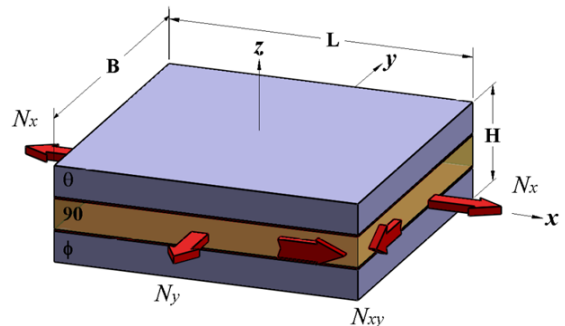
ب) حالت‌های احتمالی آسیب در هر لایه جداگانه

شکل ۲

زمانی که ترک زمینه که آسیب احتمالی بین لایه‌های ۹۰ درجه، θ و ۰ است، جدایش بین لایه‌ای منتهی از این ترک (جدایش بین لایه‌ای القایی) در مرز مشترک بین لایه‌های مجاور تشکیل می‌گردد. نویسندگان مطالعه حاضر، به دلیل داشتن آسیب در چندلایه کامپوزیت شکل ۲ (الف) دو جزء زیر را معرفی می‌کند:

۲- روش‌شناسی

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در یک سلول واحد تحت شرایط بارگذاری درون‌صفحه‌ای عمومی که در سامانه مختصات محلی لایه میانی استخراج شده است، هر لایه جداگانه ممکن است دچار آسیب مرتبط با جهت بارگذاری شود.



الف) یک چندلایه کامپوزیت تحت بارگذاری عمومی درون‌صفحه

با داشتن عامل‌های آسیب ذکر شده، می‌توان اثرات مکانیزم‌های آسیب درون لایه‌ای را بر پاسخ چندلایه کامپوزیت هدر سطح مزو در نظر گرفت. با این حال، محاسبه عامل‌های آسیب موضوعی حیاتی است که در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

مهم‌ترین چالش در رویکرد مزومکانیک، تعریف دقیق قانون تکامل آسیب و عامل‌های آسیب هر مکانیزم آسیب در هر شرایط بارگذاری است. در این بخش روش نویسندگان برای ارزیابی عامل‌های آسیب موردنیاز مربوط به هر حالت آسیب توضیح داده خواهد شد. در رویکردهای مزومکانیک که قبلاً توسعه داده شده بود، عامل‌های آسیب توسط آزمایش‌های استاندارد و غیراستاندارد متعددی تعریف شدند. به عنوان مثال در یک مدل توسعه‌یافته توسط لادوز [۱۷]، برای در نظر گرفتن ترک خوردگی ماتریس در هر لایه، جدا از ویژگی‌های الاستیک اولیه، قوانین آسیب-تکامل مدل به عامل‌های مواد مختلفی مانند $Y_c, Y_0, Y_0', Y_s, Y_s'$ و بستگی دارد. علاوه بر این، رابطه بین عامل‌های آسیب و نیروهای مربوط به Y با آزمایش‌های بارگذاری-برابرداری ویژه بر روی چندلایه با زاویه خاص تعریف شد.

۱-۲- قانون تکامل آسیب

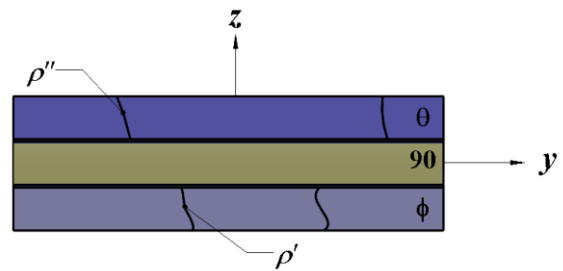
در این مقاله، برای ارزیابی نیروهای مزدوج و عامل‌های آسیب مربوط به ترک خوردگی زمینه در هر لایه 'P' در مدل مزو، از رویکرد میکرومکانیک مبتنی بر هوش مصنوعی و پردازش تصویر استفاده می‌شود. برای این هدف، یک چندلایه کامپوزیت ارتوتروپیک تحت یک میدان تنش کلی باید در نظر گرفته شود که مستعد ترک خوردگی زمینه و شکستگی الیاف است. به دنبال آن، رویکرد میکرومکانیکی هوش مصنوعی با توجه به نوع مکانیزم خرابی (شکست الیاف یا ترک زمینه) و دانسیته آن مکانیزم مقدار عامل خرابی تعیین می‌گردد. این رویکرد میکرومکانیک هم می‌تواند یک لایه منفرد ترک‌دار و هم برای یک چندلایه حاوی ترک ایجاد گردد. همچنین روش مبتنی بر هوش مصنوعی قادر است میدان‌های تنش و جابه‌جایی را تحت بارهای چندمحوری تخمین بزند و عامل‌های آسیب d_F, d_2 و d_{12} را برای هر تراکم ترک خوردگی ماتریس به دست آورد.

۲-۲- ترک خوردگی زمینه

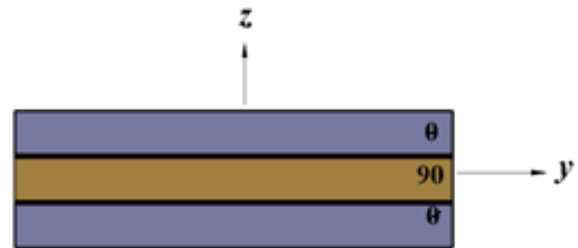
به منظور بررسی رشد ترک زمینه می‌توان با استفاده از مدل‌سازی چندلایه یا تک‌لایه کامپوزیت‌ها در نرم‌افزار آباکوس استفاده نمود. ریزساختار کامپوزیت‌ها تقویت‌شده با الیاف تحت بارگذاری‌های مکانیکی با استفاده از تحلیل المان محدود بررسی می‌گردند. نتایج این تحلیل المان محدود به عنوان راه‌حل مرجع حقیقی در این مطالعه در

- یک لایه دلخواه ($\theta, P, 90$ یا θ) دارای سفتی کاهش‌یافته که ممکن است با حالت‌های مختلف آسیب احتمالی از جمله ترک خوردگی عرضی یا شکست فیبر اتفاق افتاده باشد.
- فصل مشترک، نواحی بین لایه‌ها که مستعد تشکیل جدایش بین لایه‌ای هستند.

با در نظر گرفتن این موضوعات، سلول واحد آسیب‌دیده شکل ۳ (الف) می‌تواند با سلول واحد همگن‌شده و بدون آسیب شکل ۳ (ب) جایگزین شود که خواص مواد معادل کاهش‌یافته را برای هر جزء جداگانه دارد. لازم بذکر است در این مطالعه جدایش بین لایه‌ای در نظر گرفته نمی‌شود.



الف) المان مشخصه آسیب‌دیده



ب) المان مشخصه همگن‌سازی شده

شکل ۳

در نتیجه، ماتریس انطباق کاهش یافته لایه 'P' آسیب‌دیده را می‌توان به صورت بازنویسی کرد:

$$S_{(\rho, \gamma)}^{layer} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1(1-d_F)} & -\frac{\nu_{12}}{E_1(1-d_F)} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}(1-d_2)}{E_2(1-d_2)} & \frac{1}{E_2(1-d_2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}(1-d_{12})} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که عامل‌های d_F, d_2, d_{12} به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\begin{aligned} d_F &\approx \frac{\Delta E_1}{E_1} \\ d_2 &\approx \frac{\Delta E_2}{E_2} \\ d_{12} &\approx \frac{\Delta G_{12}}{G_{12}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$Y(\rho, \chi) = \frac{\partial \bar{U}(\rho, \chi)}{\partial d_F} \Big|_{\rho = cte} \quad (3)$$

با داشتن نیروهای مربوطه $Y(\rho, \chi)$ ، می‌توان شکست فیبر را توسط زیر ارزیابی نمود:

$$\begin{cases} \text{Whenever } Y(\rho, \chi) < Y_t \text{ or } Y(\rho, \chi) < Y_c & d_F = 0, \\ \text{Otherwise} & d_F = 1. \end{cases} \quad (4)$$

اکنون می‌توان از قوانین جریان آسیب به دست آمده در مدل مزو برای ایجاد یک مدل مکانیک خرابی پیوسته محاسباتی جدید استفاده کرد که بتواند برای پیش‌بینی پاسخ غیرخطی و آسیب پیش‌رونده چندلایه کامپوزیتی مختلف به دلیل ترک خوردگی یا شکستگی فیبر استفاده شود. شایان ذکر است علاوه بر معادله بالا می‌توان از ابزار هوش مصنوعی هم برای تحلیل رفتار الیاف استفاده نمود.

۲-۴- مدل مکانیک آسیب پیوسته پیشنهادی

همانطور که قبلاً گفته شد، در مطالعه حاضر، مدل میکرومکانیکی مبتنی بر هوش مصنوعی برای غلبه بر معایب عمده مدل‌های مزو قبلی برای پیش‌بینی اثرات آسیب در ورقه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. برای این منظور، رویکرد میکرومکانیکی ارائه شده برای چندلایه ارتوتروپیک و همچنین رویکرد ورتزر و همکاران [۲۲] برای مکانیزم خرابی ترک زمینه و شکست الیاف برنامه‌ریزی شده و به ویژگی‌های نرم افزار المان محدود انسیس تحت عنوان کد مکانیک خرابی در قالب سابروتین به نرم‌افزار انسیس اضافه می‌شود. این کد از یک استراتژی افزایشی برای حل مسائل غیرخطی پیروی می‌کند و همچنین قادر است زیر روال‌های تعریف شده توسط کاربر در زبان فرترن را به برنامه اصلی پیوند دهد. با استفاده از این تکنیک، مدل آسیب پیش‌رونده توسعه یافته که در انسیس پیاده‌سازی می‌شود، قادر به ایجاد یک رفتار مواد غیرخطی از طریق زیرروال کاربر بوزرمت است. برای این منظور، هر المان از هر لایه تجزیه می‌شود و هر نقطه گاوسی هر المان به عنوان یک سلول واحد لایه در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴ الف). برای در نظر گرفتن احتمالات حالت‌های آسیب در هر لایه، با یادآوری لایه‌های مجاور نقطه گاوس در نظر گرفته شده، یک سلول واحد چند لایه استخراج می‌شود (شکل ۴ ب) که تحت بارگذاری منتهجه از نقطه گاوسی قرار می‌گیرد. سلول واحد در نظر گرفته شده از جمله طول سلول واحد عملاً با تغییر چگالی ترک تغییر می‌کند (شکل ۴ ج) در نتیجه، می‌توان سفتی کاهش یافته سلول واحد آسیب دیده را ارزیابی کرد. روش میکرومکانیک مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی تشکیل ترک زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد و امکان شکل‌گیری ترک

نظر گرفته می‌شود. یک تحلیل کرنش صفحه‌ای تحت شرایط مرزی جابه‌جایی اعمال شده در نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود تا تانسور تنش، یعنی توزیع‌های σ_{xx} ، σ_{yy} و σ_{xy} در ریزساختار به دست آید. در این تحلیل می‌توان جهت بررسی پیدایش و رشد ترک از المان چسبناک و المان محدود گسترش‌یافته استفاده نمود. مواد تشکیل‌دهنده در کامپوزیت‌ها (الیاف و زمینه) به صورت خطی یا غیرخطی و الاستیک یا غیرالاستیک فرض می‌گردند. اتصال بین الیاف و زمینه می‌تواند به صورت کاملاً پیوسته فرض نمود. ریزساختار تحت شرایط مرزی جابه‌جایی مجزا که به بارگذاری کششی و برشی مربوط می‌شوند، قرار می‌گیرند و مجموعه‌ای از میدان‌های تانسور تنش از این شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس به دست می‌آید؛ بنابراین، تحلیل‌های المان محدود در مجموع تصاویر تنش به همراه ترک زمینه را ارائه می‌دهند.

مجموعه‌ای از تصاویر دوبعدی یا سه‌بعدی ریزساختار کامپوزیت‌ها تقویت شده با الیاف با تغییر تصادفی موقعیت مکانی الیاف در زمینه تولید می‌گردد. از الگوریتم‌های تصادفی برای موقعیت مکانی الیاف به صورت تصادفی استفاده نمود. الیاف به صورت دایره‌ای با شعاع ثابت با کسر حجمی الیاف ثابت می‌توان مدل‌سازی نمود.

مجموعه ریزساختارهای تصادفی و نقشه‌های میدان تانسور تنش حاصل از تحلیل‌های المان محدود به عنوان داده‌های آموزشی برچسب‌دار برای مدل یادگیری ماشین استفاده می‌شوند. تقویت داده‌ها باعث افزایش پایداری مدل یادگیری عمیق می‌شود، به‌ویژه در مسائل مکانیکی که معمولاً داده‌های آموزشی محدودی وجود دارد. فن‌های رایج تقویت داده‌ها در حوزه تقسیم‌بندی تصاویر شامل چرخش و معکوس‌سازی تصویر است؛ بنابراین، یک روش تقویت داده تغییر یافته که با قوانین فیزیکی مسئله سازگار باشد، به کار گرفته می‌شود.

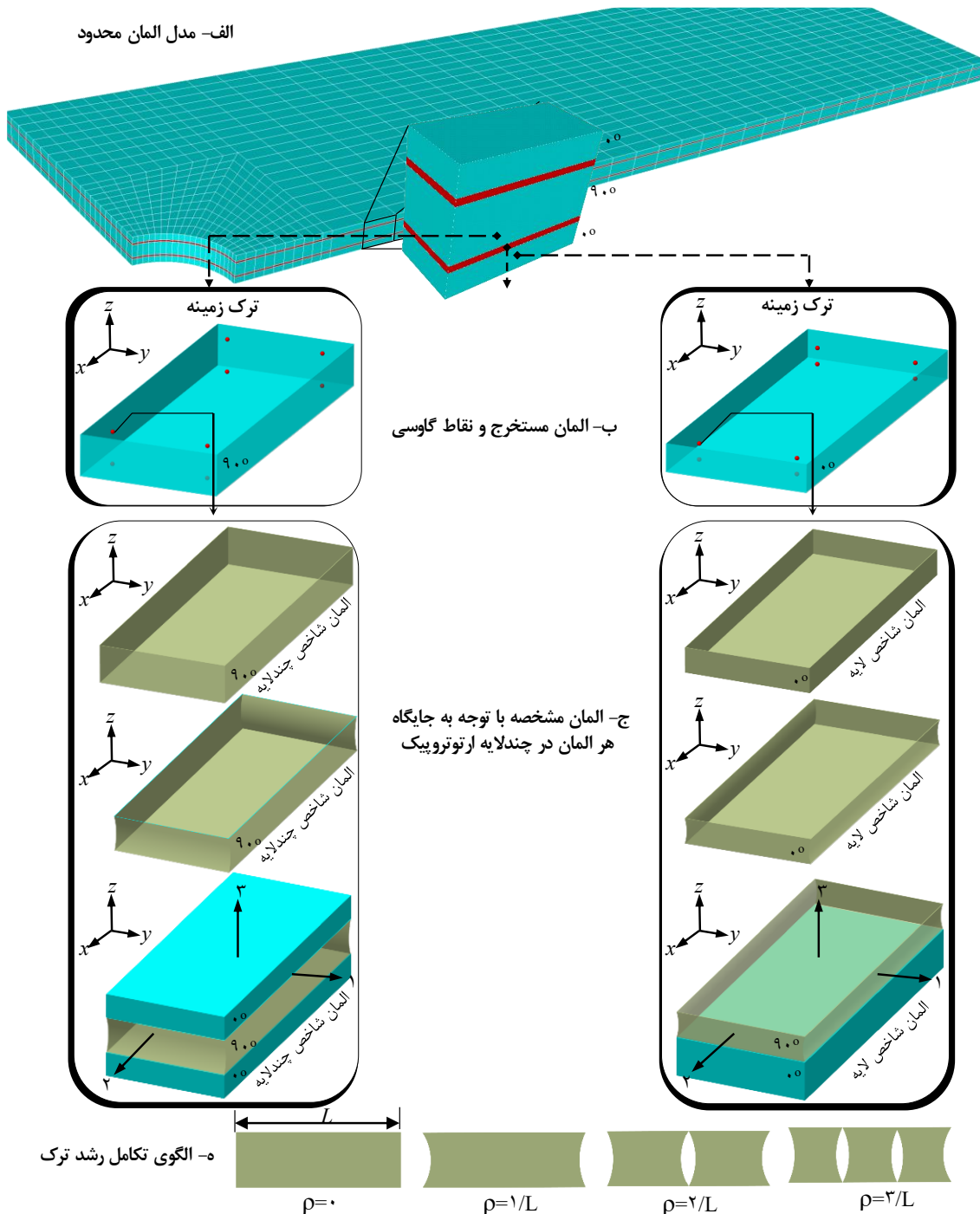
در نهایت یک مدل آموزش داده می‌شود تا ریزساختار را به نقشه‌های میدان تانسور تنش نگاهاشت کند، به طوری که پس از آموزش کامل، نیازی به استفاده از یک روش حل مسئله مبتنی بر فیزیک نباشد. یک مدل واحد از ابتدا آموزش داده می‌شود تا تنش مؤلفه از دو میدان تانسور تنش دوبعدی ناشی از آزمایش‌های کششی و برشی را با پیدایش (یا عدم پیدایش) رشد (یا عدم رشد) ترک را پیش‌بینی کند.

۲-۳- شکستگی الیاف

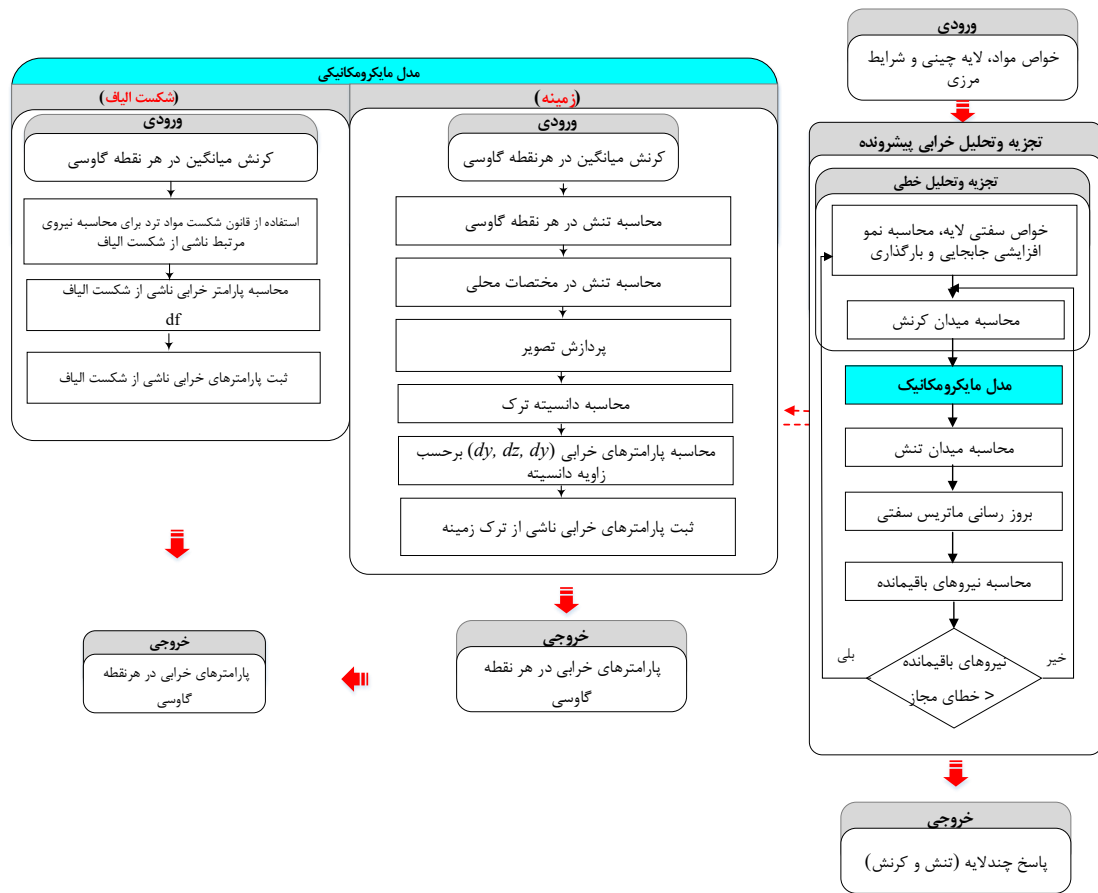
به منظور بررسی شکست الیاف از قانون شکست مواد ترد که شکست در الیاف را در کشش و فشار را از طریق دو آستانه Y_t و Y_c متمایز می‌کند، استفاده می‌گردد که این قانون به صورت زیر بیان می‌گردد.

رویکرد میکرومکانیک بهره می‌برند. این مراحل در هر نمو افزایش برای هر نقطه گاوسی در کل لایه‌ها تکرار می‌شود. به دنبال آن، نیروهای باقیمانده برای کل چندلایه محاسبه می‌شود تا معیارهای همگرایی را برآورده کند. نمودار جریان تجزیه و تحلیل آسیب پیش‌رونده توضیح داده شده در کد المان محدود در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

زمینه را تعیین می‌نماید. پس از بررسی امکان تشکیلات ترک خوردگی زمینه (با ابزار هوش مصنوعی) یا شکستن الیاف (از طریق معادله (۳) و یا ابزار هوش مصنوعی) در یک سلول واحد دلخواه، خواص کاهش یافته المان واحد با ابزار هوش مصنوعی برای چندلایه مجازی با دانسیته ترک معلوم محاسبه می‌گردد. در نتیجه با داشتن پارامتر خراب d_f ، d_1 و d_2 ، خواص نقطه گاوس در چندلایه کامپوزیت با استفاده از روابط (۱) کاهش می‌یابد. ترک خوردگی زمینه و شکست الیاف به ترتیب از

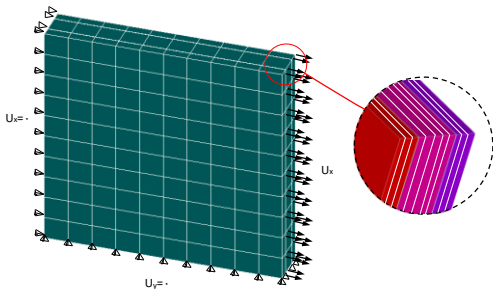


شکل ۴: الف) المان بندی معمولی یک چندلایه کامپوزیت (مدل مزو)، ب) یک سلول واحد معمولی استخراج شده از هر نقطه گاوس، ج) المان مشخصه و ه) الگوی تکامل ترک خوردگی زمینه



شکل ۵: استراتژی پیاده‌سازی رفتار غیر خطی ناشی از ترک زمینه و شکست الیاف در چندلایه مرکب

لایه نازک در شکل ۷ (الف، ب و ج) برای المان بندی های مختلف نشان داده شده است. شایان ذکر است که این شکل‌ها نشان می‌دهند که نتایج به دست آمده برای المان بندی $N \geq 3$ بسیار مشابه هستند. در نتیجه، گسسته‌سازی المان در امتداد ضخامت هر لایه برای به حداقل رساندن هزینه‌های محاسباتی، ۳ در نظر گرفته شده است.



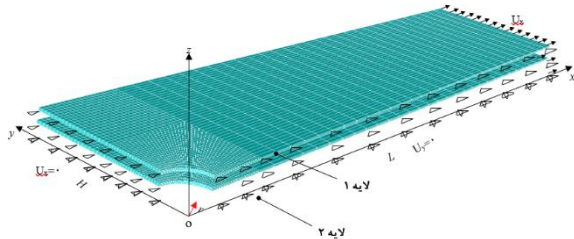
شکل ۶: نمایش مدل مربع واحد با شرایط بارگذاری و مرزی

۳- تکامل چگالی ترک در چندلایه‌های متقاطع با سوراخ مرکزی

۳-۱- گسسته‌سازی المان‌ها در چندلایه‌های مربعی متقاطع

در این بخش، برای بررسی ترک زمینه، باید تعداد بهینه گسسته‌سازی المان‌ها در امتداد ضخامت لایه بررسی شود. برای این منظور، ابتدا یک صفحه مربعی $s [90^\circ/0^\circ]$ با طول واحد و گسسته‌سازی المان‌های مختلف در امتداد جهت ضخامت تحت جابجایی کششی تک‌محوری در نظر گرفته شده است (شکل ۶) تا ثابت شود که تنش‌های خارج از صفحه در لایه‌ها و سطح مشترک به گسسته‌سازی المان محدود بستگی دارد. شایان ذکر است که صفحه مربعی با چهار تعداد المان مختلف ($N=1, 3, 4$ و 30) در جهت ضخامت گسسته‌سازی شده است. علاوه بر این، خواص مواد به ترتیب $E_1=139\text{GPa}$ ، $E_2=10\text{GPa}$ ، $\nu_{12}=0.32$ ، $G_{22}=\text{GPa } 3/5$ ، $G_{12}=\text{GPa } 5/2$ ، و $\nu_{23}=0.49$ و ضخامت لایه 0.203 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تغییرات تنش‌های خارج از صفحه (σ_{xz} و σ_{yz} ، σ_{zz}) در امتداد ضخامت

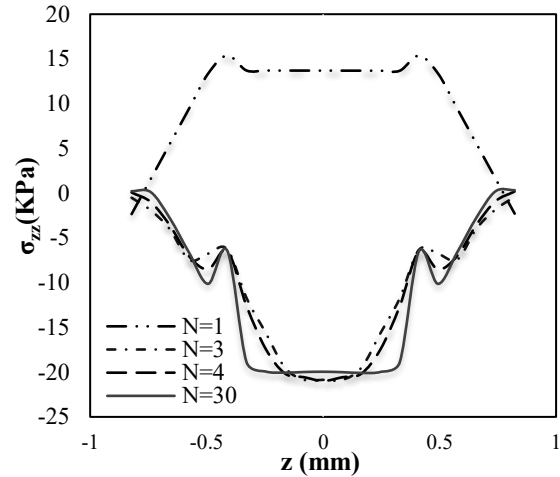
چندلایه نمونه آزمایش کشش سوراخ باز متقارن را نشان می‌دهد. شایان‌ذکر است که از المان Brick-8nodes (۲۲۰۰ المان برای هر لایه) به‌عنوان المان‌بندی اجزای محدود سه‌بعدی برای مدل‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است.



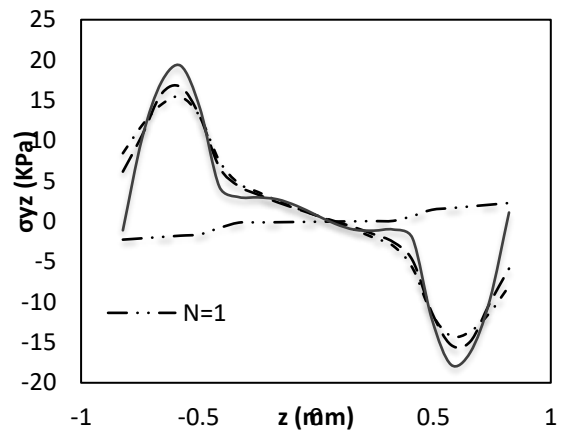
شکل ۸: المان‌بندی چندلایه متقاطع با سوراخ باز با بارگذاری و شرایط مرزی

محاسبه در جابه‌جایی‌های از پیش تعیین شده انجام شده و به دلیل ملاحظات تقارن، به یک‌چهارم هندسه محدود شده است. در ابتدا، رفتار تنش-کرنش یک چندلایه کامپوزیتی با الیاف کربن تقویت شده با پلیمر با $\sigma_s = 90.2/0.2$ بین مدل توسعه‌یافته توسط نویسندگان و نتایج آزمایش اوهیگین ۲۰۰۸ [۲۳] در شکل ۹ مقایسه شده است. خواص مواد و ابعاد هر لایه عبارتند از $E_1=139.9 \text{ GPa}$, $E_2=10 \text{ GPa}$, $G_{23}=3.5 \text{ GPa}$, $G_{12}=5.2 \text{ GPa}$, $\nu_{12}=0.32$, $\nu_{23}=0.49$, $\nu_{13}=0.32$, $G_c=450 \text{ J/m}$, ضخامت لایه $= 0.2/0.3$ میلی‌متر، $L=150 \text{ mm}$ ، $R=3 \text{ mm}$ و $H=36 \text{ mm}$ [۲۳].

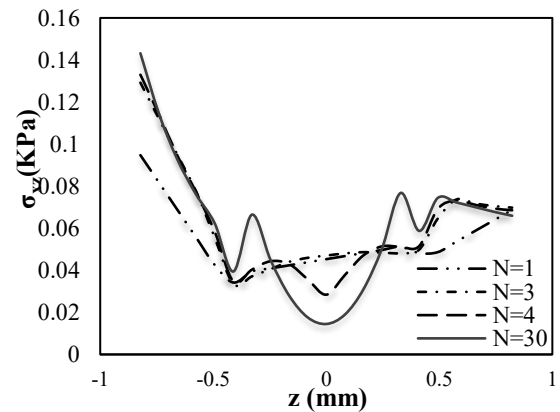
منحنی‌های تنش-کرنش با تقسیم نیروی حاصل بر مساحت در انتهای چندلایه در جهت ضخامت ایجاد می‌شوند. ترتیب زمانی تخریب‌ها (برای شروع و انتشار) پاسخ غیرخطی و در نهایت بار گسیختگی به طور دقیق پیش‌بینی گردید. این فرایند با ترک‌خوردگی عرضی در لایه ۹۰ درجه و شکافتگی متعاقب آن در لایه صفر درجه آغاز شد. این ترک‌خوردگی‌های ماتریسی باعث تخریب بیشتر در لایه‌ها گردید. در نهایت، شکستگی الیاف در لایه صفر درجه مشاهده شد و معیار شکستگی الیاف در کشش حاصل گردید.



الف



ب



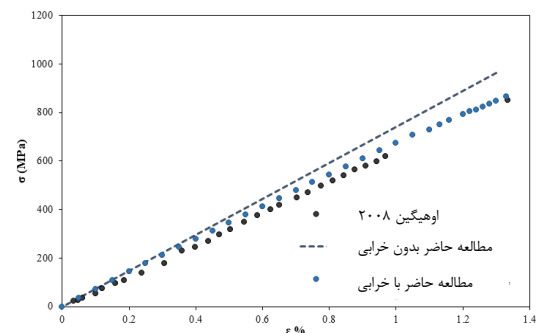
ج

شکل ۷: تغییرات تنش خارج از صفحه لایه نازک در جهت ضخامت برای یک لایه نازک [۹۰۴/۰۲]. الف) σ_{zz} ، ب) σ_{yz} و ج) σ_{xz}

۳-۲- تکامل چگالی ترک در چندلایه‌های متقاطع با سوراخ مرکزی

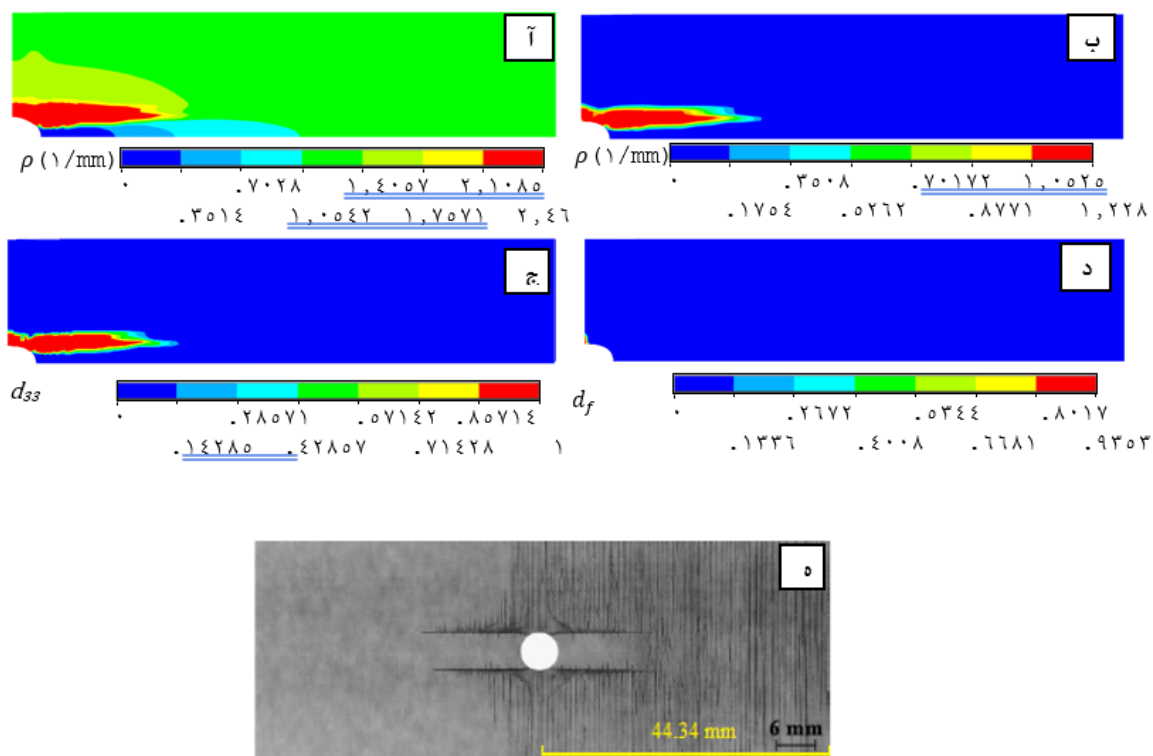
در این بخش، نتایج مدل آسیب پیش‌رونده حاصل از آزمایش‌های کشش سوراخ باز با نتایج تجربی موجود مقایسه می‌شوند (اوهیگین ۲۰۰۸). شکل ۸ شرایط مرزی و شبکه اجزای محدود سه‌بعدی یک

لمینت کربن/پوکسی S[۰۲/۹۰۲] از مرجع [۲۳] مقایسه کرد. الگوهای آسیب پیش‌بینی شده در هر لایه کامپوزیتی که از آسیب پیش‌رونده توسعه یافته با آزمایش به دست آمده است، نشان می‌دهد که پیش‌بینی شروع و تکامل حالت‌های آسیب با یافته‌های تجربی مطابقت خوبی دارد. مشاهده تجربی تکامل آسیب [۲۳] که در شکل ۱۰ (ه) ارائه شده است، نشان می‌دهد که حالت‌های آسیب غالب در این چندلایه، شکافت محوری در لایه‌های صفر درجه همراه با ترک خوردگی عرضی در لایه‌های ۹۰ درجه است. شبیه‌سازی آسیب پیش‌رونده نمونه CFRP در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در $SOHT \ 65\%$ در حالی که ترک خوردگی عرضی در لایه‌های ۹۰ درجه پدیدار گردید، تقسیم‌شدگی زمینه در لایه‌های صفر درجه در مجاورت سوراخ گسترش یافته است و مقداری شکستگی الیاف در اطراف سوراخ، همراه شده است.



شکل ۹: پاسخ تنش-کرنش لمینت CFRP [۰۲/۹۰۲] با سوراخ باز

الگوی آسیب شبیه‌سازی شده در هنگام شکست (شکل ۱۰)، که سناریوهای تخریب را از نظر ترک خوردگی ماتریس و شکستگی الیاف توصیف می‌کند، منجر به تعیین و طبقه‌بندی حالت‌های آسیب می‌شود که سپس می‌توان آنها را با توضیحات و تصاویر در یک سطح تنش در



شکل ۱۰: نمودار کانتور رویدادهای آسیب در CFRP [۰۲/۹۰۲] تحت تغییر شکل طولی $SOHT \ 65\%$ (الف) چگالی ترک خوردگی عرضی در ۹۰ درجه، (ب) لایه لایه شدن سطح مشترک، (ج) چگالی شکستگی در صفر درجه، (د) پارامتر شکست الیاف در صفر درجه، و (ه) اوهیگینز و همکاران [۲۳]

ذکر است که اولویت اصلی رویکرد توسعه‌یافته، کاهش عامل‌های تجربی ماده از قانون جریان آسیب است که معمولاً باید از آزمایش‌های استاندارد و غیراستاندارد به دست آیند. درحالی‌که رویکرد حاضر فقط به داده‌های ماده شکست (چقرمگی شکست ماده کامپوزیت، G_c) نیاز دارد، CDM توسعه‌یافته توسط لادوز و همکاران [۲۲] حداقل به ۶ عامل نیاز دارد. علاوه بر این، زمان اجرای موردنیاز برای پیاده‌سازی

به‌طورکلی، مقایسه نتایج پیش‌بینی‌شده مدل ساختاری محاسباتی توسعه‌یافته با نتایج تجربی اوهیگینز ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که نتایج پیش‌بینی‌شده آسیب پیش‌رونده توسط رویکرد پیشنهادی، تطابق قابل‌قبولی با آزمایش‌ها دارد. پاسخ‌های تنش-کرنش کلی پیش‌بینی‌شده برای چندلایه کامپوزیتی CFRP [۰۲/۹۰۲] با سوراخ باز توسط رویکرد حاضر نیز تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. شایان

۵- منابع

- [1] R. Mofidian, S. S. Hosseini, M. Miansari, and H. Salmani, *Separation and clarification of Mazandaran Wood and Paper Factory effluent to remove heavy metals using zeolite-agar nanoadsorbent immobilized by Cibacron Blue dye ligand*, *Korean Journal of Chemical Engineering*, pp. 1–12, 2024. (in Persian)
- [2] M. Jahanshahi, R. Mofidian, S. S. Hosseini, and M. Miansari, *Investigation of mechanical properties of granular γ -alumina using experimental nano indentation and nano scratch tests*, *SN Applied Sciences*, vol. 5, no. 6, p. 164, 2023. (in Persian)
- [3] B. Abdi, R. Tayebbe, E. Rezaei-Seresht, F. M. Zonoz, and R. Mofidian, *ZnO/AgSbO₃ as an improved nanophotocatalyst in the synthesis of some naphthopyranopyrimidines*, *Inorganic Chemistry Communications*, p. 113212, 2024. doi: [10.1016/j.inoche.2024.113212](https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113212)
- [4] M. Jahanshahi, R. Mofidian, and M. Hakimzadeh, *Innovative membrane distillation configurations for enhanced performance: A review*, *Journal of Engineering and Applied Research*, vol. 1, no. 2, pp. 13–27, 2024. (in Persian)
- [5] R. Mofidian, A. Barati, M. Jahanshahi, and M. H. Shahavi, *Optimization on thermal treatment synthesis of lactoferrin nanoparticles via Taguchi design method*, *SN Applied Sciences*, vol. 1, pp. 1–9, 2019. (in Persian)
- [6] R. Mofidian et al., *Adsorption of lactoferrin and bovine serum albumin nanoparticles on pellicular two-layer agarose-nickel at reactive blue 4 in affinity chromatography*, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 105084, 2021. doi: [10.1016/j.jece.2021.105084](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105084)
- [7] R. Mofidian, A. Barati, M. Jahanshahi, and M. H. Shahavi, *Generation process and performance evaluation of engineered microsphere agarose adsorbent for application in fluidized-bed systems*, *International Journal of Engineering*, vol. 33, no. 8, pp. 1450–1458, 2020. (in Persian)
- [8] J. L. Chaboche and J. F. Maire, *A new micromechanics based CDM model and its application to CMC's*, *Aerospace Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 131–145, 2002.

مدل الگوریتم توسعه یافته برای ۲۱۰۰ عنصر (Brick Solid 185) که شامل ۳۰۴۴ گره است (شکل ۸-شکل ۱۰)، در پیکربندی رایانه‌ای پردازنده Core i7-4702 با بسامد ۲/۲۰ گیگاهرتز، برابر با ۲۵ دقیقه در ۱۵۰۰ ساب استپ است.

۴- نتیجه گیری

این مطالعه روش نوآورانه‌ای را در حوزه مدل‌سازی چندمقیاسی مکانیکی ارائه می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان رفتار غیرخطی چندلایه‌های کامپوزیت با استفاده از یک مدل مکانیک آسیب پیوسته مبتنی بر هوش مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، اثرات ترک خوردگی ماتریس و شکست الیاف بر سفتی هر لایه به طور مستقل، با بهره‌گیری از یک مدل میکرومکانیکی مبتنی بر پردازش تصویر و یادگیری ماشین، در نظر گرفته شده است. این رویکرد جدید مبتنی بر فناوری‌های هوش مصنوعی، قابلیت شبیه‌سازی رفتار مکانیکی چندلایه کامپوزیت را با در نظر گرفتن مکانیزم خرابی ترک ماتریسی و شکست الیاف را داراست. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های تولید شده از شبیه‌سازی المان محدود آموزش داده شده و قادر به بازسازی دقیق میدان‌های تنش تحت شرایط بارگذاری مختلف است. چارچوب معرفی شده علاوه بر افزایش سرعت تحلیل چندمقیاسی کامپوزیت‌ها دارای مکانیزم‌های خرابی، انعطاف بالایی برای تطبیق با انواع مواد و مکانیزم‌های خرابی در مقیاس‌های کوچک‌تر دارد. این مدل به گونه‌ای طراحی شده که امکان ادغام با سایر مدل‌های یادگیری ماشین آموزش دیده برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی مواد در مقیاس‌های مختلف را فراهم می‌کند.

ویژگی‌های بارز این مدل شامل افزایش بهره‌وری در تحلیل مکانیزم‌های خرابی، پیش‌بینی رشد جدایش الیاف از ماتریس، و ارائه راهکارهایی برای همگن‌سازی و محلی‌سازی رفتار مواد با دقت بالا و کاهش نیازهای محاسباتی است. این روش انعطاف‌پذیر بوده و می‌تواند در شرایط بارگذاری گوناگون و ساختارهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد، به ویژه زمانی که داده‌های مکانیکی محدود در دسترس باشد. چشم‌انداز توسعه این روش شامل بررسی رفتارهای پیچیده‌تر مکانیکی نظیر تعامل میان مکانیزم‌های مختلف خرابی و شبیه‌سازی دقیق‌تر آنها است که نیازمند توان محاسباتی پیشرفته‌تری خواهد بود. این رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشین امکان گسترش تحلیل‌های چندمقیاسی و بهینه‌سازی ساختاری را فراهم کرده و می‌تواند در زمینه‌های متنوعی از علوم مکانیکی و مهندسی به کار گرفته شود.

Developments in Durability Analysis of Composite Systems, CRC Press, 2022, pp. 39–47.

[17] L. Daudeville, O. Allix, and P. Ladeveze, *Delamination analysis by damage mechanics: some applications*, *Composites Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 17–24, 1995. doi: [10.1016/0961-9526\(95\)93976-3](https://doi.org/10.1016/0961-9526(95)93976-3)

[18] A. F. Johnson, A. K. Pickett, and P. Rozycki, *Computational methods for predicting impact damage in composite structures*, *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 15, pp. 2183–2192, 2001. doi: [10.1016/S0266-3538\(01\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00111-7)

[19] H. Feng, Q. Xu, T. Lv, and H. Liu, *Bimetallic NH₂-MIL-101 (Fe, Co) as highly efficient photocatalyst for nitrogen fixation*, *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, vol. 351, p. 123949, 2024. doi: [10.1016/j.apcatb.2024.123949](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.123949)

[20] P. Ladevèze, F. Daghia, E. Abisset, and C. L. Mauff, *A micromechanics-based interface mesomodel for virtual testing of laminated composites*, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, vol. 1, pp. 1–16, 2014. doi: [10.1186/s40323-014-0012-2](https://doi.org/10.1186/s40323-014-0012-2)

[21] M. Wang *et al.*, *A review of CFD studies on thermal hydraulic analysis of coolant flow through fuel rod bundles in nuclear reactor*, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 171, p. 105175, 2024. doi: [10.1016/j.pnucene.2024.105175](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105175)

[22] F. Wurtzer, P.-A. Boucard, P. Ladevèze, and D. Néron, *A flexible decoupled strategy to use model reduction in the context of multiphysics problems*, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, vol. 10, no. 1, p. 1, 2023. doi: [10.1186/s40323-023-00232-3](https://doi.org/10.1186/s40323-023-00232-3)

[23] R. O'Higgins, M. McCarthy, and C. McCarthy, *Comparison of open hole tension characteristics of high strength glass and carbon fibre-reinforced composite materials*, *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 2770–2778, 2008. doi: [10.1016/j.compscitech.2008.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.001)

[9] D. H. Allen, C. E. Harris, and S. E. Groves, *A thermomechanical constitutive theory for elastic composites with distributed damage—II. Application to matrix cracking in laminated composites*, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 23, no. 9, pp. 1319–1338, 1987.

[10] E. J. Barbero and L. De Vivo, *A constitutive model for elastic damage in fiber-reinforced PMC laminae*, *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 10, no. 1, pp. 73–93, 2001. doi: [10.1106/105678901421150](https://doi.org/10.1106/105678901421150)

[11] P. Lonetti, R. Zinno, F. Greco, and E. J. Barbero, *Interlaminar damage model for polymer matrix composites*, *Journal of Composite Materials*, vol. 37, no. 16, pp. 1485–1504, 2003. doi: [10.1177/00219983030371604](https://doi.org/10.1177/00219983030371604)

[12] P. P. Camanho, P. Maimí, and C. G. Dávila, *Prediction of size effects in notched laminates using continuum damage mechanics*, *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 13, pp. 2715–2727, 2007. doi: [10.1016/j.compscitech.2007.02.005](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.02.005)

[13] P. F. Liu and J. Y. Zheng, *Progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite laminates using continuum damage mechanics*, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 485, no. 1–2, pp. 711–717, 2008. doi: [10.1016/j.msea.2007.08.073](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.073)

[14] B. Mohammadi, H. Olia, and H. Hosseini-Toudeshky, *Intra and damage analysis of laminated composites using coupled continuum damage mechanics with cohesive interface layer*, *Composite Structures*, vol. 120, pp. 519–530, 2015. doi: [10.1016/j.compstruct.2014.10.031](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.10.031) (in Persian)

[15] J. F. Chen, E. V. Morozov, and K. Shankar, *A combined elastoplastic damage model for progressive failure analysis of composite materials and structures*, *Composite Structures*, vol. 94, no. 12, pp. 3478–3489, 2012. doi: [10.1016/j.compstruct.2012.04.021](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.04.021)

[16] P. Ladevèze, *Modelling and computation until final fracture of laminate composites*, in *Recent*